

西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩 PT 轨迹、SHRIMP 锆石定年及其大地构造意义

曲军峰^① 张立飞^{①*} 艾永亮^② 吕 增^① 王建平^③ 周 辉^① 王世炎^③

(^① 北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; ^② 河南理工大学, 焦作 454100; ^③ 河南省地质调查研究院, 郑州 450007)

摘要 在新疆西昆仑塔什库尔干北康西瓦构造带一线发现了高压麻粒岩. 根据地质温压计的计算, 其峰期高压麻粒岩相变质条件为 760~820°C, 1.0~1.2 GPa; 角闪岩相退变的温压条件为 620~720°C, 0.7~0.8 GPa. 高压麻粒岩具有顺时针 PT 轨迹特征, 并具有明显的石榴石的“白眼圈”减压结构, 代表了碰撞造山过程中增厚的下地壳抬升折返地表的动力学过程. 锆石 U-Pb SHRIMP 分析结果表明高压麻粒岩中的锆石显示出两组年龄, 核部所代表的原岩年龄为(456±30) Ma, 变质边部所代表的高压麻粒岩的角闪岩相退变质的年龄为(177±6) Ma. 该区高压麻粒岩的形成与古特提斯洋的演化紧密相关, 它的发现表明西昆仑康西瓦断裂可能代表了古特提斯洋向北俯冲消减的界线, 对于探讨古特提斯构造域和古亚洲洋构造域关系及其演化都具有重要意义.

关键词 西昆仑 康西瓦断裂 高压麻粒岩 PT 轨迹 SHRIMP 锆石定年

西昆仑山位于青藏高原的西北缘, 它西延与帕米尔东构造结相连, 东连东昆仑-阿尔金造山带, 是目前研究古亚洲洋构造域和古特提斯构造域关系的关键地区, 引起了学者们的普遍关注. 目前普遍接受的大地构造格局如图 1(a)所示 [1-6]. 在西昆仑的大地构造演化研究中具有重要研究意义的是康西瓦断裂带, 通常认为康西瓦断裂带与古特提斯洋关闭密切相关, 是划分特提斯构造域和古亚洲洋构造域的界线 [1-9]. 但在这条带上一一直没有确切的高压变质岩石的报道. 本研究在新疆西昆仑塔什库尔干北康西瓦构造带附近发现了高压麻粒岩, 计算其形成演化的 PT 轨迹, 以及锆石 U-Pb 年龄, 并探讨其在西昆仑大地构造演化方面的地质意义.

1 区域地质概况和野外产状特征

研究区位于新疆塔什库尔干县靠近中国-阿富汗边境地区, 康西瓦断裂沿北西-南东方向通过该区. 研究主体西南侧为布伦阔勒群, 该区研究程度比较低, 尚无详细的划分方案, 统归为古元古界, 主要以角闪岩相变质的黑云母斜长片麻岩、混合质石榴黑云母斜长片麻岩和绿帘角闪岩为主, 夹有一些石英岩、大理岩等, 有新生代的小岩体侵入. 潘裕生等 [1-3] 提出西昆仑地区大地构造单元由北至南划分为北昆仑地体、南昆仑地体、甜水海地体和喀喇昆仑-羌塘地体. 研究区出露的布伦阔勒群相当于他们的甜水海地体(图 1), 它向东南延伸与肖文交等 [10,11] 研究提出

收稿日期: 2006-05-05; 接受日期: 2007-02-28

河南地质调查院西昆仑西段蛇绿混杂岩带岩石大地构造演化研究项目和国家自然科学基金项目(批准号: 40325005)资助

* 联系人, E-mail: lfzhang@pku.edu.cn

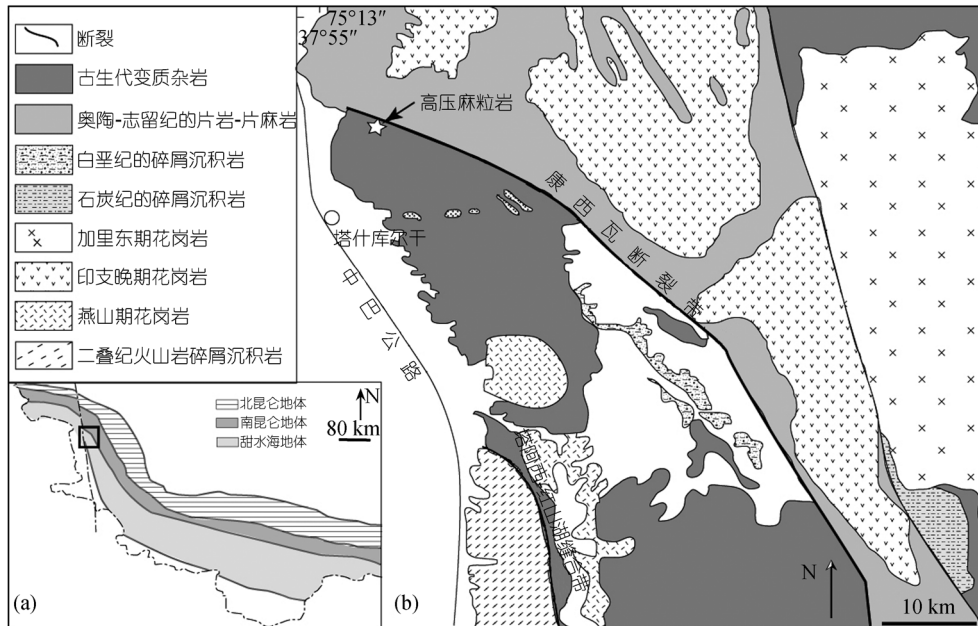


图 1 西昆仑研究区区域地质图

(a) 改编自潘裕生 [2]; (b) 改编自河南地调院 1:250000 塔什库尔干、克克吐鲁克地区区域地质图. 箭头处为新发现的高压麻粒岩的露头

的俯冲杂岩带相连. 康西瓦断裂东北侧为一套未分的志留-奥陶纪地层, 研究程度较低, 主要岩性为钙质千枚岩、变质砂岩、钙质绢云母片岩、绿泥石绢云母大理岩、厚层大理岩及石英片岩等.

新发现的高压麻粒岩位于塔什库尔干县城北 15 km 旧水电站附近, 高程 3045 m 处. 位于康西瓦断裂带上, 地理位置为 $37^{\circ}52'50''\text{N}$, $75^{\circ}17'01''\text{E}$, 任留东等 [12] 最早于此发现石榴角闪岩. 高压麻粒岩以呈透镜体产于石榴石斜长角闪岩中(图 2(a)和(b)), 石榴斜长角闪岩呈夹层状与石榴二云母片麻岩互层逐渐过渡为二云母斜长片麻岩(图 3). 在石榴石斜长角闪岩中呈透镜体的高压麻粒岩一般为长为 30~50 cm, 宽 20~40 cm(图 2(a)和(b)), 与构造混杂岩带为断层接触关系. 整个剖面从西北向东南方向, 出现以角闪岩相变质的石榴石斜长角闪岩为主夹杂高压麻粒岩、石榴二云母片麻岩、斜长片麻岩迅速变化到绿片岩相变质的石英云母片岩、绢云母片岩等(图 3). 中间部位的构造混杂岩带剪切变形强烈, 岩石表现明显的剪切变形, 部分已经变为糜棱岩. 剖面东北侧被第四纪覆盖, 沿走向向东南最终被花岗岩长岩岩体穿切. 康西瓦断裂由此处向西向北延至布伦口, 最终向西出国境至乌孜别里山口.

2 岩相学与矿物化学

岩石呈灰褐色, 块状构造, 手标本上具有明显的石榴石“白眼圈结构”, 即深红色的石榴石被白色的斜长石所围绕(图 2(a)和(b)). 粒状变晶结构, 主要由石榴石(15%~25%)、单斜辉石(20%~30%)、斜长石(20%~30%)、角闪石(15%~20%)等组成, 另含有少量的金红石、钛铁矿、磷灰石、榍石等副矿物. 石榴角闪岩呈深绿黑色, 块状构造.

(1) 石榴石: 粒径 0.5~2 mm, 多以粒状、筛状变斑晶出现, 周围被长石环绕形成冠状体, 即所谓的“白眼圈结构”(图 2(c)和(h)), 内部包含大量的包裹体矿物如单斜辉石、钛铁矿、金红石等. 部分石榴石退变十分强烈, 呈残余状(图 2(e)), 有的基本被后期矿物完全替代. 石榴石的化学成分变化不明显, 其中镁铝榴石(Prp)(13%~18%), 钙铝榴石(Grs)(25%~29%), 铁铝榴石(Alm)(51%~59%), 锰铝榴石(Sps)(4%~6%) (表 1). 总体而言, 核部的 Mg 含量略高于边部, 可能代表了一个降温的过程. Ca 的含量从核至边并没有明显的变化, 这可能是由于石榴石内部扩散作用的影响造成的 [13,14]. 即在退变质期间石榴石中的 Ca 在缓慢的冷却的过程中逐渐丢失, 造成了原本富 Ca 的

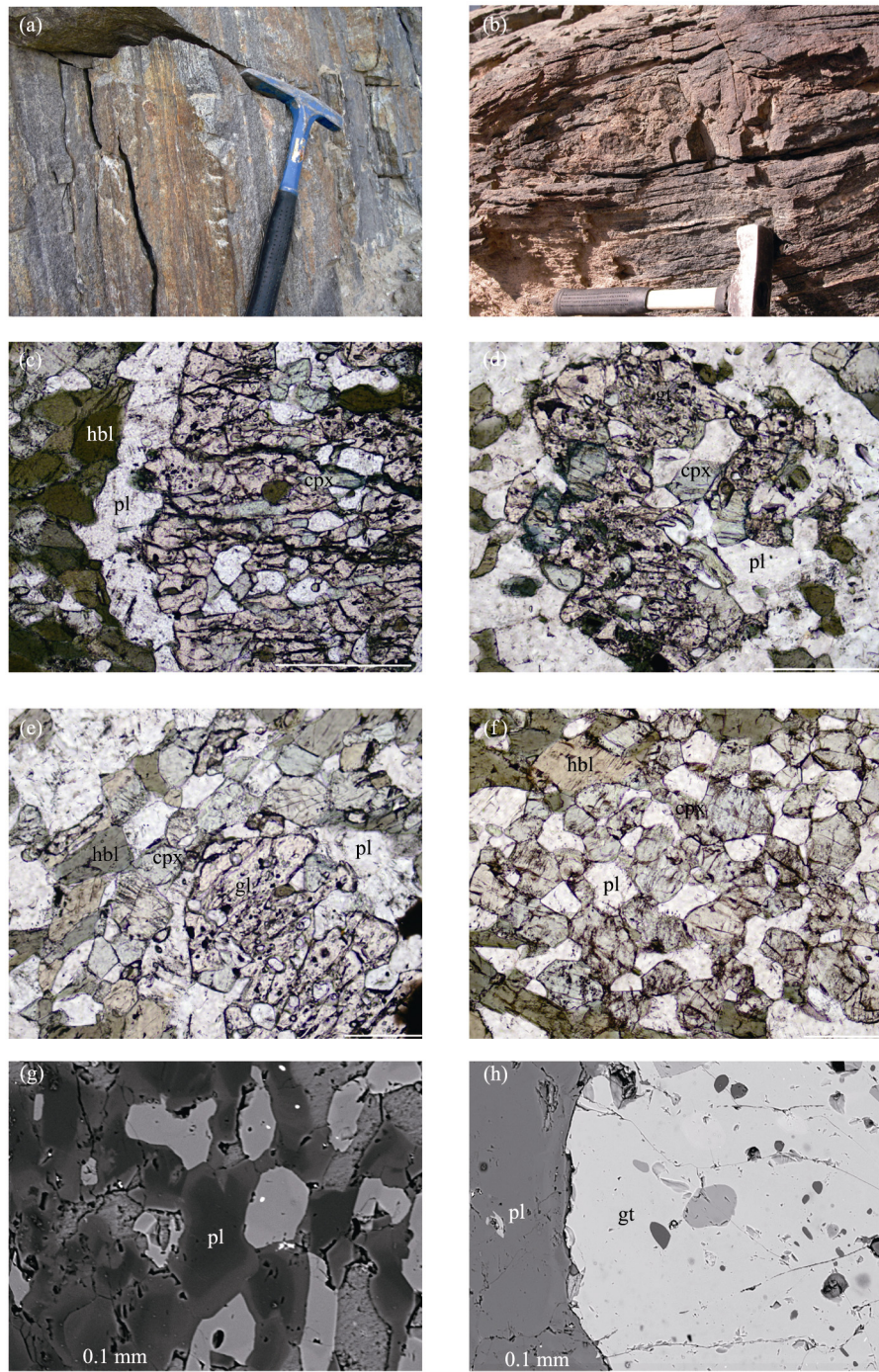


图 2 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩的野外照片及电子显微镜下结构特征

(a) 野外高压麻粒岩露头; (b) 野外高压麻粒岩露头, 石榴石具明显的“白眼圈”特征; (c) 长石在石榴石周围形成冠状边, 内部有单斜辉石、斜长石、石英等包裹体; (d), (e) 石榴石后期退变强烈; (g), (h) 背散射照片, 具有环带特征的斜长石. (c), (d), (e), (f) 比例尺为 0.5 mm; (g), (h) 比例尺为 0.1 mm

石榴石最终贫 Ca, 并且失去环带特征(图 4), 这一点也许可以从斜长石的成分环带中得到暗示(见后叙斜长石讨论部分).

(2) 单斜辉石: 淡绿色, 粒径 < 1 mm, 多为粒状,

自形到半自形晶(图 2(d)). 或者与斜长石构成石榴石退变的环边, 即所谓的“白眼圈结构”(图 2(c), (d))或者以变斑晶形式存在, 或者以包裹体形式出现在石榴石之中. 部分单斜辉石的边部被角闪石替代, 形成

翠绿色的环边. 矿物成分主要为透辉石(表 2). 观察到的各类单斜辉石具有较明显的成分差别, 石榴石包裹体中的单斜辉石和以变斑晶出现的单斜辉石的

核部成分中的 Al_2O_3 和 Na_2O 含量明显比其它单斜辉石和边部成分高(图 5). 单斜辉石中 Al 和 Na 的降低代表了一个降温降压的退变过程.

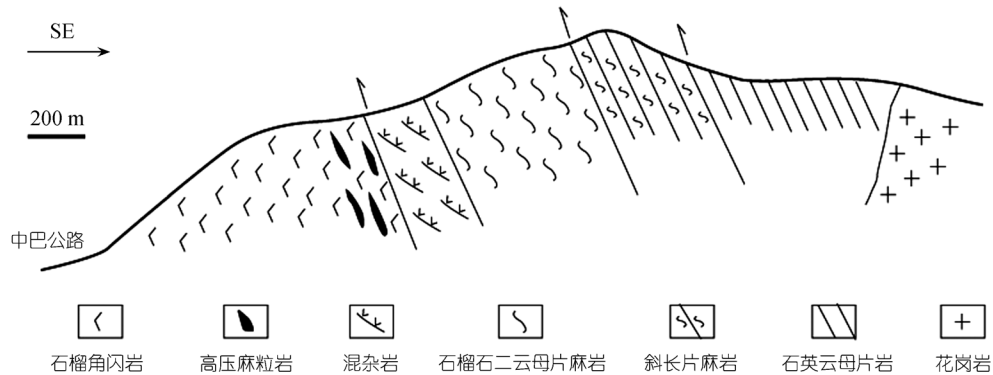


图 3 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩产出剖面图

表 1 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩中石榴石电子探针成分表^{a)}

样品号	T404-1-11	T404-1-12	T404-2-9	T404-2-10	T404-2-5	T404-2-6	T404-1-4	T404-1-5	T404-1-1	T404-1-2	T404-1-14	T404-1-15
测点位置	c	r	c	r	c	r	c	r	c	r	c	r
SiO ₂	38.95	38.86	38.70	38.70	39.17	38.54	38.26	38.60	38.39	38.28	38.44	38.45
TiO ₂	0.05	0.08	0.01	0.02	0.04	0.00	0.03	0.00	0.04	0.05	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	21.28	21.33	21.74	21.08	21.67	21.28	21.50	21.87	21.73	21.64	21.51	21.48
Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.08	0.00	0.11	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	0.17	0.01
FeO _t	23.84	23.92	24.78	23.23	23.25	23.37	24.02	24.71	25.25	24.89	25.05	24.39
MnO	2.17	2.05	1.85	2.17	1.91	2.09	1.69	1.79	2.25	3.01	1.92	1.89
MgO	4.52	4.16	4.38	4.18	4.35	4.11	4.47	3.98	3.62	3.26	3.51	3.20
CaO	9.29	9.41	9.56	9.86	9.77	10.12	9.68	9.44	9.37	9.12	10.56	10.86
Na ₂ O	0.03	0.16	0.00	0.09	0.05	0.01	0.01	0.07	0.13	0.13	0.07	0.05
总量	100.13	100.01	101.10	99.33	100.32	99.52	99.66	100.47	100.78	100.43	101.23	100.35
Si	3.033	3.032	2.992	3.038	3.034	3.023	2.995	3.004	2.989	2.999	2.980	3.007
Ti	0.003	0.005	0.001	0.001	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.003	0.000	0.001
Al	1.954	1.962	1.982	1.951	1.979	1.968	1.984	2.007	1.995	1.999	1.966	1.980
Cr	0.000	0.002	0.005	0.000	0.007	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003	0.010	0.001
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.027	0.000	0.000	0.000	0.024	0.000	0.042	0.014	0.074	0.010
Fe ²⁺	1.553	1.561	1.575	1.525	1.506	1.533	1.548	1.608	1.602	1.616	1.550	1.585
Mn	0.143	0.135	0.121	0.144	0.125	0.139	0.112	0.118	0.148	0.200	0.126	0.125
Mg	0.525	0.484	0.505	0.489	0.502	0.480	0.521	0.462	0.420	0.381	0.406	0.373
Ca	0.775	0.787	0.793	0.829	0.811	0.850	0.812	0.787	0.782	0.766	0.877	0.910
Na	0.005	0.024	0.000	0.014	0.008	0.002	0.002	0.011	0.020	0.020	0.011	0.008
合计	7.990	7.993	8.000	7.992	7.974	7.994	8.000	7.997	8.000	8.000	8.000	8.000
XAlm	0.518	0.526	0.526	0.511	0.512	0.511	0.517	0.541	0.543	0.545	0.524	0.530
XSpS	0.048	0.046	0.040	0.048	0.042	0.046	0.037	0.040	0.050	0.067	0.043	0.042
XPrp	0.175	0.163	0.169	0.164	0.171	0.160	0.174	0.155	0.142	0.129	0.137	0.125
XGrs	0.259	0.265	0.265	0.278	0.275	0.283	0.271	0.265	0.265	0.259	0.296	0.304
Mg#	0.253	0.237	0.243	0.243	0.250	0.238	0.252	0.223	0.208	0.191	0.208	0.191

a) 电子探针数据于北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室获得, 仪器型号: JXA-8100; 分析条件: 加速电压 15 kV; 束流 1×10^{-8} A; 束斑 $1 \mu\text{m}$; 修正方法 PRZ; 标准样品为美国 SPI 公司 53 种矿物. c 代表核部, r 代表边部, ex 代表包体, 下同. SiO_2 ~ Na_2O 数据单位为质量百分比, 下同

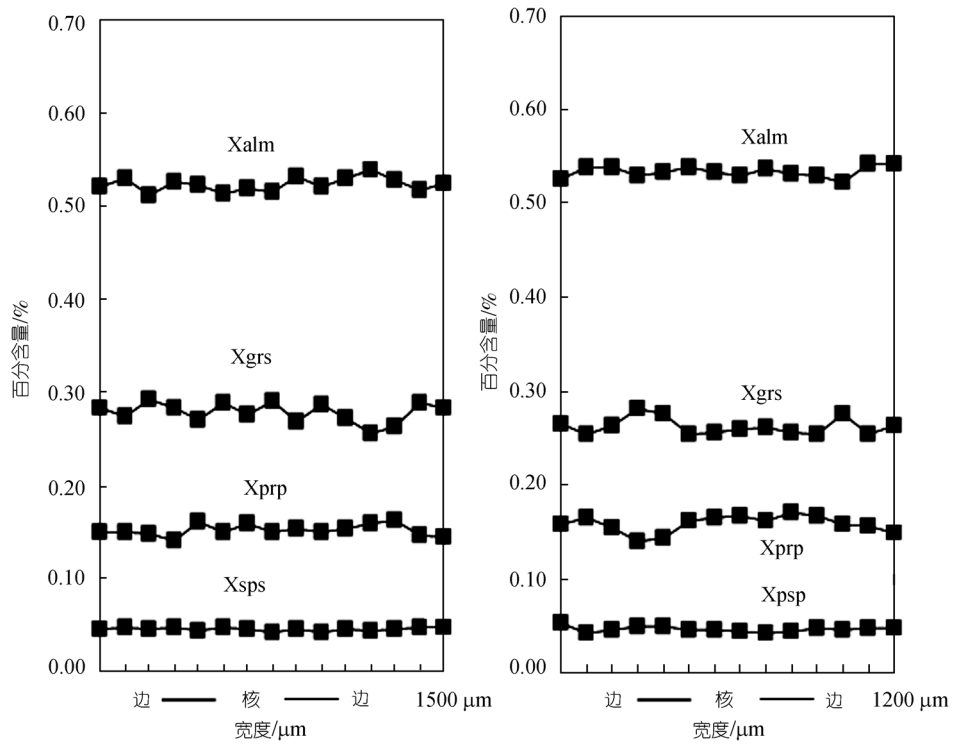


图 4 高压麻粒岩中石榴石成分环带图

表 2 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩中单斜辉石电子探针成分表

样品号	c1-9	c1-11	c1-10	c1-12	c1-13	c1-14	c2-8	c2-15	c2-3	c2-4	c2-5	c2-7
测点位置	c	r	c	r	c	r	c	r	ex	ex	ex	ex
SiO ₂	51.42	52.89	51.10	52.68	51.32	52.47	52.04	51.43	51.66	51.96	51.66	51.51
TiO ₂	0.08	0.03	0.13	0.07	0.40	0.03	0.27	0.28	0.13	0.10	0.19	0.22
Al ₂ O ₃	2.25	0.67	2.38	0.88	3.09	0.68	2.75	3.08	1.71	1.84	2.24	2.25
Cr ₂ O ₃	0.00	0.09	0.00	0.03	0.07	0.09	0.03	0.00	0.08	0.00	0.22	0.03
FeO _T	11.04	9.83	11.12	9.16	10.12	9.55	9.92	10.57	10.25	9.77	9.34	9.28
MnO	0.27	0.36	0.39	0.38	0.25	0.26	0.21	0.10	0.24	0.19	0.15	0.28
MgO	11.04	12.24	11.29	12.85	11.20	12.07	11.42	11.46	11.62	12.07	11.78	11.99
CaO	22.33	23.18	22.27	23.33	21.97	24.03	22.32	22.20	22.80	23.25	22.80	23.06
Na ₂ O	0.95	0.78	0.94	0.45	0.76	0.32	0.71	0.79	0.70	0.73	0.68	0.77
总量	99.38	100.07	99.62	99.83	99.18	99.50	99.67	99.91	99.19	99.91	99.06	99.39
Si	1.944	1.979	1.926	1.973	1.942	1.981	1.958	1.930	1.955	1.945	1.952	1.936
Ti	0.002	0.001	0.004	0.002	0.011	0.001	0.008	0.008	0.004	0.003	0.005	0.006
Al	0.100	0.030	0.106	0.039	0.138	0.030	0.122	0.136	0.076	0.081	0.100	0.100
Cr	0.000	0.003	0.000	0.001	0.002	0.003	0.001	0.000	0.002	0.000	0.007	0.001
Fe ³⁺	0.077	0.064	0.104	0.043	0.009	0.026	0.000	0.046	0.056	0.076	0.029	0.071
Fe ²⁺	0.272	0.243	0.246	0.244	0.311	0.275	0.312	0.286	0.268	0.230	0.266	0.221
Mn	0.009	0.011	0.012	0.012	0.008	0.008	0.007	0.003	0.008	0.006	0.005	0.009
Mg	0.622	0.683	0.634	0.717	0.632	0.679	0.640	0.641	0.655	0.673	0.663	0.672
Ca	0.904	0.929	0.899	0.936	0.891	0.972	0.900	0.893	0.924	0.933	0.923	0.929
Na	0.070	0.057	0.069	0.033	0.056	0.023	0.052	0.058	0.051	0.053	0.050	0.056
合计	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	3.999	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Jd	4.627	0.959	3.507	1.387	9.130	1.243	8.793	7.406	3.459	2.911	5.715	4.198
Mg#	0.696	0.738	0.720	0.746	0.670	0.712	0.672	0.691	0.710	0.745	0.714	0.753

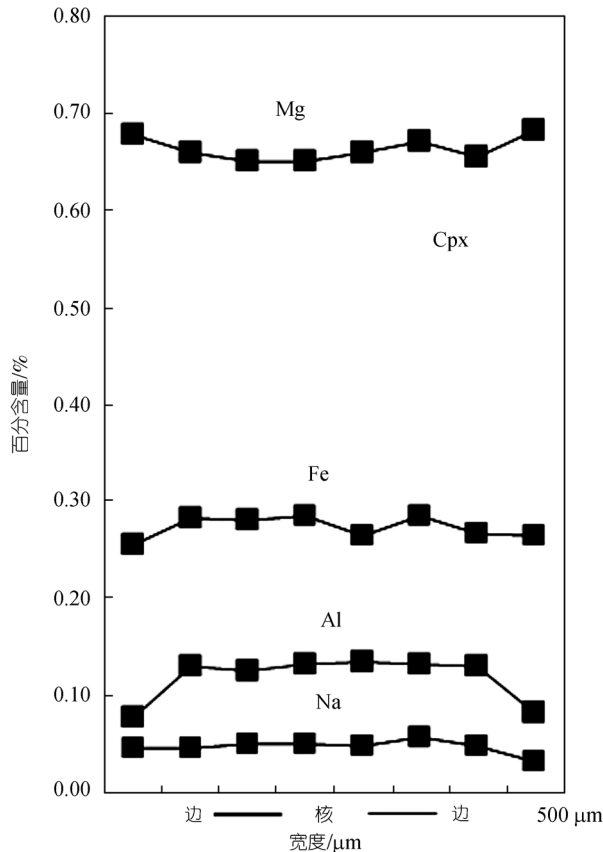


图 5 高压麻粒岩中单斜辉石成分环带图

(3) 斜长石: 粒径<1 mm, 有两种主要存在形式: 一种呈冠状体环绕在石榴石颗粒周边, 此类长石具有轻微的成分环带(An: 47~57); 另外一种以变斑晶出现, 具有十分明显的成分环带, An 含量由核至边变化为 23~62(表 3, 图 6). 斜长石的这种明显的成分环带变化表明, 在高压麻粒岩退变过程中, 原高压下形成的 Ca 含量较高的石榴石随着压力的降低 Ca 的含量在逐渐减少, 部分 Ca 形成了退变压力较低条件下形成的富 Ca 长石. 此外, 样品的退变非常强烈, 构成石榴石冠状体的长石很有可能受到后期角闪岩相退变的影响, 使得退变长石与原高压麻粒岩相阶段的长石发生 Ca 的均一化而导致长石的 An 含量的升高.

(4) 角闪石: 角闪石的具体成分见表 4. 主要以三种形式存在: 一种是与长石共同形成石榴石的冠状边, 一种为石榴石内部的包裹体, 还有一种形成单斜辉石的环边, 为单斜辉石退变的产物. 前两类角闪石的成分差异不大, 均为深褐色, 也没有明显的成分环带, Tsi=6.0~6.7, ANa+AK>0.5, Ti<0.5, 除部分属于铁韭闪石外均属于韭闪石类 [15].

(5) 其他矿物: 样品中还有少量的钛铁矿、金红石、磷灰石、榍石和锆石等副矿物, 它们多以包裹体

表 3 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩中斜长石电子探针成分表^{a)}

样品号	p1-12	p2-1	p2-5	p1-14	p1-10	p2-7	p2-3	p1-14	p2-6	p1-11	p1-13	p2-2	p1-5	p2-6
测点位置	c	r	c	r	ex	r	c	r	c	r	c	r	ex	ex
SiO ₂	56.98	50.98	61.57	57.51	59.04	53.11	58.78	53.97	59.23	55.59	57.26	51.00	58.04	58.14
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00
Al ₂ O ₃	27.37	29.97	23.60	27.26	25.72	29.95	25.41	29.25	26.00	28.19	27.04	30.73	26.25	26.06
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
FeO _T	0.11	0.25	0.14	0.10	0.05	0.10	0.20	0.16	0.11	0.16	0.12	0.16	0.02	0.64
MnO	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
MgO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01
CaO	8.69	12.99	5.43	8.77	7.77	12.25	7.40	11.15	7.25	9.89	8.65	13.02	8.35	8.16
Na ₂ O	7.28	4.31	8.96	6.25	7.72	5.06	8.13	5.38	8.39	6.23	7.14	4.37	7.41	7.53
K ₂ O	0.04	0.07	0.18	0.15	0.06	0.10	0.15	0.07	0.18	0.06	0.06	0.08	0.05	0.06
总量	100.47	98.61	99.95	100.04	100.37	100.58	100.07	100.03	101.21	100.12	100.27	99.42	100.17	100.61
Si	2.548	2.351	2.740	2.572	2.631	2.395	2.632	2.438	2.623	2.500	2.563	2.333	2.598	2.594
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	1.443	1.630	1.238	1.437	1.351	1.592	1.341	1.558	1.357	1.494	1.427	1.657	1.385	1.371
Cr	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.004	0.010	0.005	0.004	0.002	0.004	0.007	0.006	0.004	0.006	0.004	0.006	0.001	0.024
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001
Ca	0.416	0.642	0.259	0.420	0.371	0.592	0.355	0.540	0.344	0.477	0.415	0.638	0.400	0.390
Na	0.631	0.385	0.773	0.542	0.667	0.442	0.706	0.471	0.720	0.543	0.620	0.388	0.643	0.652
K	0.002	0.004	0.010	0.009	0.003	0.006	0.009	0.004	0.010	0.003	0.003	0.005	0.003	0.003
合计	5.045	5.023	5.029	4.983	5.027	5.031	5.051	5.018	5.061	5.023	5.033	5.031	5.031	5.035
Xab	0.60	0.37	0.74	0.56	0.64	0.43	0.66	0.46	0.67	0.53	0.60	0.38	0.61	0.62
Xan	0.40	0.62	0.25	0.43	0.36	0.57	0.33	0.53	0.32	0.47	0.40	0.62	0.38	0.37

a) SiO₂-K₂O 数据单位为质量百分比, 下同

表 4 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩中角闪石电子探针成分表^{a)}

样品号	a1-10	a1-9	a1-2	a1-3	a1-6	a1-7	a2-13	a2-14	a2-6	a2-2	a2-3	a2-9
SiO ₂	43.24	44.36	43.98	43.95	39.72	43.67	41.33	40.52	44.58	43.20	43.88	45.04
TiO ₂	1.25	1.00	1.10	1.22	0.36	0.63	1.24	1.34	0.77	1.21	1.11	0.69
Al ₂ O ₃	12.44	11.13	12.02	11.88	17.52	12.52	13.77	13.66	11.39	12.31	11.73	11.14
Cr ₂ O ₃	0.01	0.10	0.01	0.04	0.07	0.02	0.07	0.00	0.11	0.08	0.09	0.01
FeOr	16.20	15.76	16.06	16.63	19.48	17.65	17.40	17.89	15.68	16.80	16.40	15.86
MnO	0.13	0.20	0.27	0.23	0.34	0.30	0.31	0.27	0.19	0.18	0.13	0.23
MgO	10.06	10.54	10.50	10.40	6.17	8.60	9.01	8.81	10.30	9.58	9.98	10.64
CaO	11.61	11.58	11.38	11.33	11.77	11.57	11.40	11.32	12.31	11.77	11.80	11.75
Na ₂ O	2.24	1.64	2.05	2.67	1.86	1.56	1.80	2.03	1.41	1.98	1.85	1.60
K ₂ O	0.31	0.26	0.34	0.46	0.48	0.22	1.28	1.36	0.27	0.31	0.31	0.25
总量	97.49	96.57	97.71	98.81	97.77	96.74	97.61	97.20	97.01	97.42	97.28	97.21
Si	6.444	6.629	6.509	6.480	5.983	6.567	6.218	6.155	6.641	6.462	6.552	6.677
Ti	0.140	0.112	0.122	0.135	0.041	0.071	0.140	0.153	0.086	0.136	0.125	0.077
Al	2.186	1.961	2.097	2.065	3.111	2.220	2.442	2.446	2.000	2.171	2.065	1.947
Cr	0.001	0.012	0.001	0.005	0.008	0.002	0.008	0.000	0.013	0.009	0.011	0.001
Fe ³⁺	0.146	0.199	0.239	0.172	0.344	0.185	0.273	0.275	0.133	0.138	0.129	0.205
Fe ²⁺	1.873	1.770	1.749	1.878	2.110	2.035	1.916	1.998	1.821	1.964	1.919	1.761
Mn	0.016	0.025	0.034	0.029	0.043	0.038	0.040	0.035	0.024	0.023	0.016	0.029
Mg	2.234	2.347	2.316	2.285	1.385	1.927	2.020	1.995	2.287	2.136	2.221	2.351
Ca	1.854	1.854	1.805	1.790	1.900	1.864	1.838	1.843	1.965	1.887	1.888	1.867
Na	0.647	0.475	0.588	0.763	0.543	0.455	0.525	0.598	0.407	0.574	0.536	0.460
K	0.059	0.050	0.064	0.087	0.092	0.042	0.246	0.264	0.051	0.059	0.059	0.047
合计	15.602	15.435	15.526	15.689	15.562	15.407	15.666	15.762	15.429	15.559	15.519	15.423

a) 按 23 个 O 和 Fe 电价平衡, 除去 Na, K, Ca 外 13 个阳离子计算; 其中除 a1-6 和 a1-7 为铁韭闪石外, 其他皆为韭闪石(Leake 等^[15])

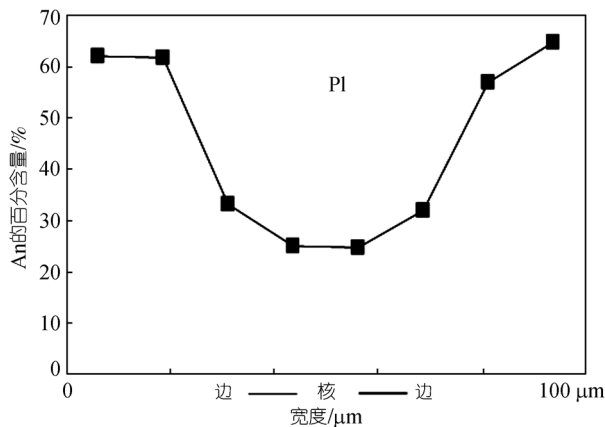


图 6 高压麻粒岩中斜长石成分环带图

矿物出现在石榴石变斑晶中。

3 变质温压条件计算及 PT 轨迹

根据上述岩相学研究, 结合矿物成分分析, 研究区的基性高压麻粒岩至少经历了两期变质作用演化, 即峰期高压麻粒岩相变质阶段和角闪岩相退变的过程。峰期高压麻粒岩相变质阶段的代表性矿物组合为 Grt(核)+Cpx(核)+Pl(核 An: 23)+Ru+Qtz; 角闪岩相退变的变质矿物组合为 Grt(边)+Hbl+Pl(边 An: 62)。

峰期变质的温压条件根据石榴石与单斜辉石之间的 Fe-Mg 交换反应确立的温度计^[16-19], 以及 Grt-Cpx-Pl-Qtz 压力计^[20-22]进行计算。温压条件计算时石榴石、单斜辉石和斜长石选取核部成分进行峰期温压计算, 计算结果如表 5 和 6 所示, 高压麻粒岩峰期的变质条件为 760~820℃, 1.0~1.3 GPa。

后期角闪岩相退变的温压条件使用 Grt-Amp 地质温度计^[23,24]和 Grt-Hbl-Pl 地质压力计进行计算^[25]。在计算时石榴石和斜长石都采用同一颗粒的边部成分, 得到的温压条件为 620~720℃, 0.7~0.8 GPa。这样在 PT 图上就得到一个顺时针的 P-T 轨迹, 如图 7 所示。

同时还应用最新的 THERMOCALC^[29]软件, 结合 A-X 活度计算平均温压计算方法, 进一步对温压条件进行计算验证。峰期麻粒岩相变质的平均温压为 810~910℃, 1.1~1.4 GPa, 后期退变的平均温压为 650~800℃, 0.7~0.9 GPa。所得结果与传统温压计相比压力和温度都略高一些, 应该代表塔什库尔干高压麻粒岩的温压条件的上限(图 7)。

综合以上两种温压计算方法, 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩峰期麻粒岩相的变质温压条件为

表 5 峰期麻粒岩相及退变角闪岩相的温度计算表^{a)}

样品号	峰期高压麻粒岩相 $T/^\circ\text{C}$					退变角闪岩相 $T/^\circ\text{C}$		
	Lnk _d	Te	Tp	Tk	Ts	Lnk _d	Tg	Tpe
T404-1	1.794	798.86	781.72	770.93	808.14	1.357	718.02	629.18
T404-2	1.817	806.12	789.61	781.27	806.65	1.389	725.19	621.52

a) 采用的温度计为: Te, Ellis等^[16]; Tp, Powell^[17]; Tk, Krogh^[18]; Ts, Sengupta等^[19]; Tg, Graham等^[23]; Tpe, Perchuk等^[24]

表 6 峰期麻粒岩相及退变角闪岩相的压力计算表^{a)}

样品号	峰期高压麻粒岩相 P/kbar			退变角闪岩相 P/kbar
	Pn	Pp	Pe	Pk
T404-1	lnkd=-2.252, P=10.60	lnkd=6.044, P=12.61	lnkd=-2.008, P=13.49±1.9	lnkd(Mg)=-2.460, P=7.97; lnkd(Fe)=1.069, P=8.01
T404-2	lnkd=-2.240, P=10.46	lnkd=6.049, P=12.39	lnkd=-1.999, P=13.32±1.9	lnkd(Mg)=-3.489, P=7.25; lnkd(Fe)=-0.079, P=7.27

a) 采用的压力计为: Pn, Newton等^[20]; Pp, Powell等^[21]; Pe, Eckert等^[22]; Pk, Kohn等^[25]

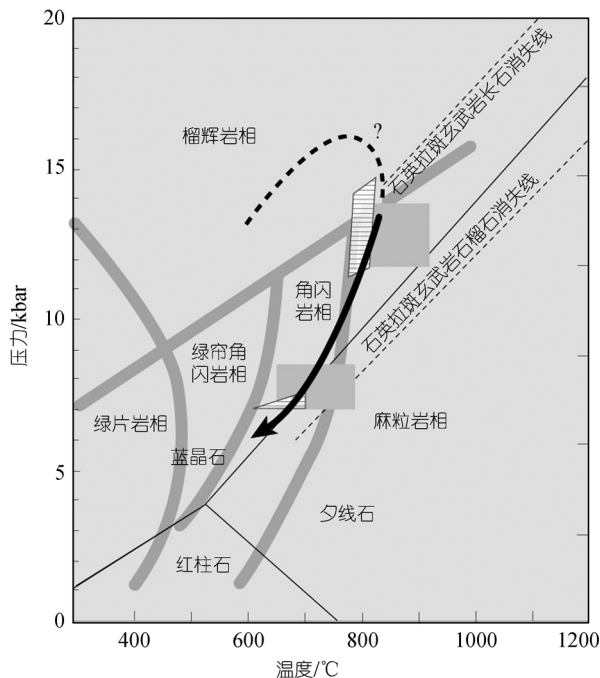


图 7 西昆仑塔什库尔干高压变质岩的变质 PT 轨迹

暗色阴影为 THERMOCALC 计算所得的温压条件范围, 格子为传统地质温压计计算所得温压范围; PT 格子中各变质相引自文献[26]; 变石英拉斑玄武岩中石榴石消失线和斜长石消失线引自文献[27]; Al_2SiO_5 三相点引自文献[28]

760~820 $^\circ\text{C}$, 1.0~1.2 GPa; 角闪岩相退变的温压条件为 620~720 $^\circ\text{C}$, 0.7~0.8 GPa.

典型的高压麻粒岩是以不出现斜方辉石, 而出现单斜辉石-石榴石-斜长石矿物共生组合为特征^[30]. 如上的温压条件计算的结果表明, 塔什库尔干高压麻粒岩的峰期变质的温压条件落入高压麻粒岩范围(图 7). 结合其中的石榴石具有明显的由斜长石和单斜辉石组成的退变“白眼圈结构”或称冠状体(corona)结构(图 2(c), (d)和(h)), 这种退变的石榴石的冠状体

结构在高压麻粒岩中较普遍, 已在几个典型的高压麻粒岩中都有报道, 如早元古的恒山高压麻粒岩^[31], 华北克拉通上的桑干高压麻粒岩^[32]. 通常认为这种石榴石的冠状体退变结构代表了高压麻粒岩经历了高压变质峰期之后的减压过程, 先形成后成合晶结构, 进一步形成冠状体^[30,33]. 因此, 塔什库尔干高压麻粒岩形成过程中经历了一个明显的减压过程, 但由于后期的角闪岩相(650~800 $^\circ\text{C}$, 0.7~0.9 GPa)退变质作用非常强烈或持续的时间比较长, 对原后成合晶结构改造非常强烈, 但仍有部分的后成合晶结构以石榴石的冠状体形式被保留下来了. 近来, O'Brien等^[30]进一步根据高压麻粒岩及其围岩变质作用特征, 将高压麻粒岩划分成两种成因类型: 一种是经历过榴辉岩相的PT条件退变形成的 高压麻粒岩; 另一类是与高温-超高温变质泥质岩石相伴生的, 从超高温麻粒岩相降温过程形成的高压麻粒岩. 塔什库尔干高压麻粒岩周围岩石主要是角闪岩相变质的石榴石斜长角闪岩, 至今没有发现高温-超高温变质岩石, 结合其具有明显的石榴石冠状体特征, 推测其形成可能是经历了榴辉岩相的温压条件. 结合其角闪岩相的退变作用, 其可能的变质过程PT轨迹如图 7 所示, 具有顺时针的P-T轨迹特征, 可能代表了碰撞造山过程中增厚的下地壳抬升折返地表的动力学过程.

4 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

(1) 样品与分析方法

用做 SHRIMP U-Pb 定年的锆石样品是从约 15 kg 左右岩石样品中经人工分离出的, 锆石数量大于 100 粒, 但颗粒普遍较小, 可能是由于样品粉碎的原因, 部分锆石形态不完整. 选取颗粒较大的锆石制靶, SHRIMP 锆石 U-Pb 分析采用 SHRIMP II, 使用样品

标准 SL13(572 Ma) 标定标样 TEMORA1(217 Ma) 和待测锆石的 U, Th 和 Pb 含量, 锆石的 U, Th 和 Pb 同位素比值使用 TEMORA1 标定. 使用 Squid 和 Isoplot 软件进行数据处理和年龄计算.

(2) 锆石阴极荧光(CL)图像特征

塔什库尔干高压麻粒岩中锆石的 CL 图像采用环境扫描电镜阴极荧光光谱仪测得, 仪器型号 Quanta 200F, MonoCL3+, 图像如图 8 所示. 除了部分破碎导致的形态不完整外, 其余锆石多呈圆形至椭圆形, 粒径在 50~200 μm 之间. 大多数锆石显示明显的双层结构, 即由一个暗色的核部和一个明亮的边组成. 核与边的界限明显, 应该分别形成于两次不同的事件. 锆石核部常见有长条形磷灰石的包裹体, 代表了岩石的原岩锆石. 边部的 CL 的图像清晰显示为面状、扇状或云雾状的分带等变质成因结构 [34~36], Raman 分析还发现部分锆石变质边内有角闪石或透辉石的矿物包体. 由于角闪岩相退变的过程中有大量水的参与, 为锆石的生长提供了更有利的条件, 使得锆石增生出变质边. 因此本研究认为锆石的明亮边是高压麻粒岩相在退变质到角闪岩相的过程中形成的. 其年龄应该代表了角闪岩相退变质的年龄.

(3) 锆石 U-Pb 定年测定结果

16 颗锆石 23 次分析结果见表 7. 所得的结果主

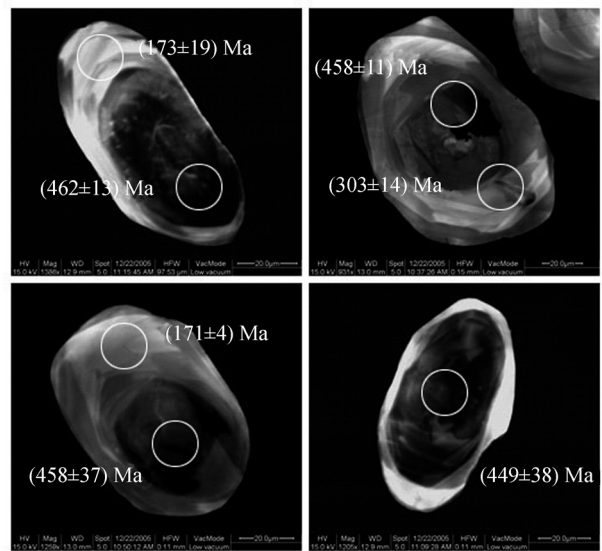


图 8 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩锆石阴极荧光图

要集中于两个年龄段, 其中 10 个核部的年龄点加权平均年龄为(456±30) Ma, 11 个边部的年龄点加权平均年龄为(177±6) Ma, 另外有两个 300 Ma 左右的年龄点, 可能是边部和核部的混合年龄点(图 9). 其中锆石边部的 Th/U 比值为 0.03~0.29, 锆石核部的 Th/U 比值在 0.22~1.22 之间(除一个颗粒为 0.08 外), 这也进一步说明锆石明亮的边可能是变质过程中形成的,

表 7 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩中锆石 U-Pb 定年分析数据表^{a)}

样品号	Th/U	普通 ²⁰⁶ Pb/%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±σ	²⁰⁶ Pb 年龄	±2σ
T323-6-1.1	0.05	0.09	0.0275	0.0019	0.1490	0.0500	0.0393	0.0125	175	12
T323-6-4.1	0.24	0.15	0.0673	0.0066	0.3210	0.1620	0.0346	0.0167	420	40
T323-6-5.1	0.07	0.02	0.0481	0.0022	0.3810	0.0620	0.0575	0.0086	303	14
T323-6-6.1	0.25	0.07	0.0759	0.0049	0.7190	0.2450	0.0687	0.0224	471	30
T323-6-7.1	0.22	0.29	0.0272	0.0029	0.0130	0.0980	0.0034	0.0260	173	19
T323-6-8.1	0.22	0.10	0.0707	0.0045	0.2900	0.1090	0.0297	0.0108	440	27
T323-6-9.1	0.18	0.10	0.0752	0.0055	0.4680	0.1530	0.0451	0.0140	467	33
T323-6-10.1	0.16	0.16	0.0312	0.0025	0.0850	0.1030	0.0197	0.0236	198	16
T323-6-11.1	0.08	0.09	0.0737	0.0061	0.5680	0.2500	0.0560	0.0236	458	37
T323-6-12.1	0.29	0.18	0.0721	0.0064	0.5620	0.3360	0.0565	0.0329	449	38
T323-6-14.1	0.33	0.21	0.0284	0.0030	0.1980	0.1050	0.0507	0.0257	180	19
T323-6-15.1	0.19	0.47	0.0286	0.0053	0.3380	0.5010	0.0856	0.1240	182	33
T323-6-16.1	1.22	0.04	0.0745	0.0045	0.5470	0.0890	0.0533	0.0076	463	27
T323-6-1.2	0.03	0.59	0.0311	0.0016	0.6353	0.9790	0.1483	0.0614	197	66
T323-6-2.2	0.27	0.06	0.0744	0.0041	0.5496	0.1174	0.0536	0.0244	462	13
T323-6-4.2	0.18	0.05	0.0273	0.0044	0.2065	0.0910	0.0549	0.0229	174	4
T323-6-5.2	0.38	0.05	0.0736	0.0047	0.6207	0.1320	0.0612	0.0214	458	11
T323-6-7.2	0.29	0.32	0.0298	0.0028	0.2131	0.4708	0.0518	0.0359	189	15
T323-6-8.2	0.43	0.03	0.0661	0.0046	0.4257	0.0977	0.0467	0.0215	413	10
T323-6-9.2	0.13	0.03	0.0517	0.0046	0.4081	0.0924	0.0573	0.0219	325	8
T323-6-10.2	0.19	0.27	0.0289	0.0026	0.0939	0.7083	0.0235	0.0380	184	15
T323-6-11.2	0.04	0.03	0.0269	0.0047	0.1847	0.1350	0.0499	0.0212	171	4

a) 普通 ²⁰⁶Pb/%: 普通铅中的 ²⁰⁶Pb 占全铅 ²⁰⁶Pb 的百分数; 应用实测 ²⁰⁸Pb 和 Cumming 等 [37] 的模式铅成分校正普通铅

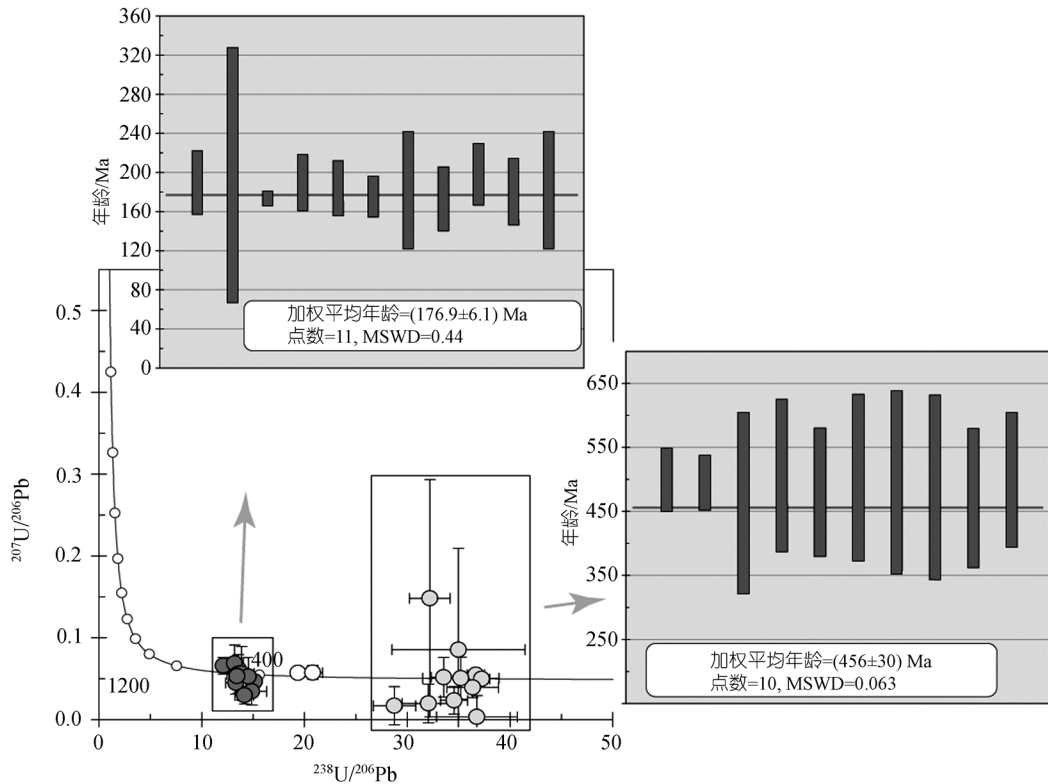


图9 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩中锆石 SHRIMP 年龄图

而核部可能属于岩浆成因锆石。因此, 本文认为塔什库尔干基性高压麻粒岩的原岩形成年龄为 (456 ± 30) Ma, 角闪岩相退变质年龄为 (177 ± 6) Ma。这个角闪岩相退变质年龄 (177 ± 6) Ma代表了峰期高压麻粒岩相变质年龄的下限, 即高压麻粒岩相变质的时代应比角闪岩相退变质的时代稍早几到几十百万年。因为通常认为在一次造山-构造变质热事件中从峰期变质到退变质阶段要几到几十百万年, 不可能超过 100 Ma, 因此 (456 ± 30) Ma 不可能是高压麻粒岩相的峰期时代, 应该代表高压麻粒岩的原岩年龄, 而高压麻粒岩的峰期变质时代可能比 (177 ± 6) Ma 略早几或几十百万年。

5 大地构造意义探讨

康西瓦构造走滑断裂作为西昆仑一条重要的构造界限长期以来受到众多学者们的普遍重视, 许多专家将其厘定为板块构造缝合带, 认为古特提斯洋最终闭合于此 [1~5,38~40], 但作为构造缝合带, 康西瓦地区却少有蛇绿混杂岩和高压变质岩的发现。近年随着康西瓦地区研究工作的深入, 肖文交等 [10,11,41~43] 认为在塔什库尔干东部的库地-麻扎地区原甜水海地体可能是俯冲杂岩体, 而康西瓦断裂北侧的赛利亚

克岩浆带可能属于古生代岛弧。近年又有在麻扎地区发现石榴二辉麻粒岩的报道 [44,45], 虽然他们计算的应力条件为 0.47 GPa [45], 但它的形成与古特提斯洋的演化可能相关。从它围岩中挑选出的锆石获得的数据也得到在早古生代和三叠纪两组年龄, 因此我们认为可以与本文研究的麻粒岩进行对比, 但至今没有深入研究这类石榴石二辉麻粒岩的岩石学, 至于它们之间如何联系还有待进一步探讨。本研究发现的塔什库尔干地区的高压麻粒岩是目前西昆仑地区康西瓦带上唯一的高压变质岩石, 对于确立康西瓦断裂带的性质及其在西昆仑大地构造演化方面的研究都具有重要意义, 它的发现进一步表明西昆仑康西瓦地区曾发生过板块的俯冲、构造叠置过程, 康西瓦断裂可能代表了古特提斯洋向北俯冲消减的界线。SHRIMP定年结果表明其角闪岩相退变质年龄为 (177 ± 6) Ma, 说明高压麻粒岩的形成要略早于这个年龄。从岩相学的观察来看, 该岩石退变得比较强烈, 经历了较长时间的角闪岩相退变质作用, 因此推断高压麻粒岩形成的时代可能是在三叠纪末之前, 这与区域地质以及前人在本区的工作基本吻合。而年龄为 (456 ± 30) Ma的原岩性质尚需进一步的研究, 由

表8 西昆仑山西段沿康西瓦断裂带已发表的部分岩石年龄数据统计表

位置	岩性	年龄/Ma	测试方法	资料来源
康西瓦断裂带以北	英云闪长岩	494±4.5	角闪石 Ar-Ar	潘裕生等 ^[3]
		455±5	锆石 U-Pb	潘裕生等 ^[3]
康西瓦断裂带以南阿克阿孜岩体	二长花岗岩	211.8±10.4	黑云 Ar-Ar	潘裕生等 ^[3]
		214.9±1.5	锆石 U-Pb	袁超等 ^[49]
康西瓦断裂带南麻扎花岗岩岩体	二长花岗岩为主, 少量花岗闪长岩	183.9±1.4	黑云 Ar-Ar	潘裕生等 ^[3]
		199.3±2.5	锆石 U-Pb	潘裕生等 ^[3]
康西瓦断裂带南三十里营房岩体	二长花岗岩	187.7±1.2	黑云 Ar-Ar	潘裕生等 ^[3]
康西瓦南部分岩体	黑云母花岗岩	191.0±4.8	锆石 U-Pb	潘裕生等 ^[3]
康西瓦断裂带以北	含石榴石二辉麻粒岩的片麻岩	420~460	锆石 U-Pb	郭坤一等 ^[44]
		230~280		
塔什库尔干北 15 km	黑云母花岗岩	199.2	锆石 U-Pb	潘裕生等 ^[3]
康西瓦南带县南桥	花岗岩	180±10	全岩 Ar-Ar	Arnaud 等 ^[50]
		193±10	全岩 Rb-Sr	Arnaud 等 ^[50]
库地北岩体	花岗岩	404±3.1	锆石 U-Pb	袁超等 ^[49]
康西瓦断裂北赛拉图岩体	混合花岗岩	423	黑云母 K-Ar	李永安等 ^[38]
康西瓦断裂北徐结艾子岩体	花岗闪长岩	201.4	黑云母 K-Ar	李永安等 ^[38]
康西瓦断裂南哈巴克西岩体	二长花岗岩	178.5	白云母 K-Ar	李永安等 ^[38]
康西瓦断裂南国庆桥岩体	二长花岗岩	201.7	黑云母 K-Ar	李永安等 ^[38]

于 Th/U 比值并不能完全确定锆石的成因, 在没有确切观察到典型的岩浆锆石结构前很难确定该基性岩的原岩性质. 结合其具有顺时针演化的 PT 轨迹特点, 塔什库尔干高压麻粒岩可能代表了该区早古生代岩石随特提斯洋闭合时, 由于俯冲碰撞出现了增厚的陆壳, 导致形成了高压麻粒岩, 在后期喜山造山过程中康西瓦构造带活动抬升、折返地表.

已有研究表明, 康西瓦构造一线以北的地区发育有两条岛弧花岗岩带, 现有的年龄资料显示它们分别形成于加里东期和印支期^[46,47], 代表了该区的两次俯冲碰撞时间(表 8). 这种俯冲碰撞可能是刚性块体之间的作用^[1~3,5,38~40], 也可能是增生作用使连续的增生体逐渐拼贴^[41~43,48]. 但无论是哪种机制, 都显示西昆仑造山带经历了早古生代和中生代两次重要构造事件, 并且在西昆仑这一狭长的区域内叠加复合. 这一长期复杂的演化过程中造就并残存了大量构造形迹, 赋存了有关造山带形成演化的大量信息. 本次新发现的高压麻粒岩就是在这样复杂的过程中形成的, 记录了重要的西昆仑造山带演化的信息. 如前所述, 研究区内基性高压变质岩的矿物组合及计算所得的 P-T 条件显示岩石至少经历了峰期高压麻粒岩相变质和后期角闪岩退变质的两个过程, 构成了顺时针的 PT 轨迹. 另外, 从周围岩石的石榴石斜长角闪岩变质程度看, 它的成因不太可能是与高温-超高温变质有关, 因此很有可能是与退变的榴辉岩变质

作用有关. 高压麻粒岩的形成与板块之间的俯冲作用、大陆间的碰撞等构造加厚模式有关, 并伴随着抬升^[30,33]. 结合已有的区域资料, 该高压麻粒岩的形成很可能与古特提斯洋的消减闭合有关, 可能是由古特提斯洋消减引发的微陆块之间的碰撞或者微陆块与岛弧地体之间的碰撞形成的. SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄表明峰期高压麻粒岩相变质的时代可能为晚三叠到早侏罗, 这与前人在康西瓦东部报道的古特提斯洋闭合的时间基本吻合, 但年轻 10~20 Ma 左右. 这可能暗示古特提斯的闭合不是等时的, 可能是东部早些, 而西部稍晚, 或者在西昆仑西端曾出现过一个小短暂的残留洋盆, 也可能在西昆仑最后结束俯冲的时间要比前人所厘定的晚. 具体的格局尚需要进一步的大地构造研究.

6 结论

(1) 在塔什库尔干地区的康西瓦断裂带上发现了基性高压麻粒岩, 它经历了两期变质作用, 峰期高压麻粒岩相矿物组合为: 石榴石-单斜辉石-斜长石-金红石, 退变角闪岩相矿物组合: 角闪石-斜长石. 温压计算表明高压麻粒岩相的温压条件为 760~820°C, 1.0~1.2 GPa; 角闪岩相退变的温压条件为 620~720°C, 0.7~0.8 GPa. 高压麻粒岩具有顺时针退变 PT 轨迹特点.

(2) SHRIMP 锆石 U-Pb 定年表明, 高压麻粒岩的

原岩年龄为(456±30) Ma, 高压麻粒岩的角闪岩相退变质作用的年龄为(177±6) Ma, 代表了高压麻粒岩变质时代的下限年龄。

(3) 西昆仑康西瓦断裂是中国西部重要的构造界线, 可能代表了古特提斯洋向北俯冲消滅的界线。

致谢 参加野外工作的还有李旭平博士等, 论文完成过程中得到魏春景教授、宋述光博士及宋彪博士的帮助和指导, 肖文交研究员、袁超研究员审阅了全文, 提出了宝贵的修改意见, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 潘裕生. 昆仑山区构造区划初探. 自然资源学报, 1989, 4(3): 196—203
- 2 潘裕生. 西昆仑山构造特征及演化. 地质科学, 1990, (3): 224—232
- 3 潘裕生, 李幼铭, 李立敏, 等. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社, 2000
- 4 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社, 1992
- 5 邓万明. 喀喇昆仑-西昆仑地区蛇绿岩地质特征及其大地构造意义. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 98—111
- 6 李向东, 王克卓. 塔里木盆地西南及邻区特提斯格局和构造意义. 新疆地质, 18(2): 113—120
- 7 李向东, 王元龙. 康西瓦走滑构造带及其大地构造意义. 新疆地质, 1996, 14(4): 204—211
- 8 王元龙, 李向东, 黄智龙. 新疆西昆仑康西瓦构造带地质特征及演化. 地质地球化学, 1996, (2): 48—54
- 9 丁道桂, 王道轩, 刘伟新, 等. 西昆仑造山带与盆地. 北京: 地质出版社, 1996
- 10 肖文交, 李继亮, 侯泉林, 等. 西昆仑东南构造样式及其对增生弧造山作用的意义. 地球物理学报, 1998, 41(增刊): 133—141
- 11 Xiao W J, Han F L, Windley B F, et al. Multiple accretionary orogenesis and episodic growth of continents: insights from the Western Kunlun range, Central Asia. *Int Geol Rev*, 2003, 45: 303—328
- 12 任留东, 陈炳蔚. 西昆仑造山带中巴公路段石榴角闪岩形成的变质地质过程. 地球学报, 2003, 24(3): 219—224
- 13 Carswell D A, O'Brien P J. Thermobarometry and geotectonic significances of high-pressure granulites: examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria. *J Petrol*, 1993, 34: 427—459
- 14 Tracy R J. Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals. In: Ferry J M, ed. *Characterisation of Metamorphism Through Mineral Equilibria. Reviews in Mineralogy*. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1982. 355—397
- 15 Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *Can Mineral*, 1997, 35: 219—246
- 16 Ellis D J, Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib Mineral Petrol*, 1979, 71: 13—22
- 17 Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *J Metamorph Geol*, 1985, 3: 231—243[DOI]
- 18 Krogh E J. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer—a reinterpretation of existing experimental data. *Contrib Mineral Petrol*, 1988, 99: 44—48[DOI]
- 19 Sengupta P, Dasgupta S, Bhattacharya P K, et al. Mixing behavior in quaternary garnet solid solution and an extended Ellis and Green garnet-clinopyroxene geothermometer. *Contrib Mineral Petrol*, 1989, 103: 223—227[DOI]
- 20 Newton R C, Perkins D III. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. *Am Miner*, 1982, 67: 203—222
- 21 Powell R, Holland T J B. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *J Metamorph Geol*, 1988, 6: 173—204[DOI]
- 22 Eckert J O, Newton R C, Kleppa O J. The ΔH of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry. *Am Miner*, 1991, 76: 148—160
- 23 Graham C M, Powell R. A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing and application to the Pelona Schist, Southern California. *J Metamorph Geol*, 1984, 2: 13—31[DOI]
- 24 Perchuk L L, Aranovich L Y, Podleskii K K, et al. Precambrian granulites of the Aldan Shield, eastern Siberia, USSR. *J metamorph Geol*, 1985, 3: 265—310[DOI]
- 25 Kohn M J, Spear F S. Two new geobarometers for garnet amphibolites, with applications to southeastern Vermont. *Am Miner*, 1990, 75: 89—96
- 26 Spear F S. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1993
- 27 Green D H, Ringwood A E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. *Geochim Cosmochim Acta*, 1967, 31: 767—833
- 28 Holdaway M J. Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. *Am J Sci*, 1971, 271: 97—131
- 29 Powell R, Holland T, Worley B. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *J Metamorph Geol*, 1998, 16: 577—588[DOI]
- 30 O'Brien P J, Rotzler J. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *J Metamorph Geol*, 2003, 21: 3—20[DOI]
- 31 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. High-Pressure Granulites (Retrograded Eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: petrology and tectonic implications. *J Petrol*, 2001, 42(6): 1141—1170[DOI]
- 32 Guo J H, O'Brien P J, Zhai M. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China craton: metamorphic evolution, P-T paths and geotectonic significance. *J Metamorph Geol*, 2002, 20(8):

- 741—756[DOI]
- 33 Harley S L. The origins of granulites: a metamorphic perspective. *Geol Mag*, 1989, 126: 215—247
- 34 Vavra G, Gebauer D, Schmid R, et al. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): anion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 122: 337—358[DOI]
- 35 Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 380—404[DOI]
- 36 简平, 程裕淇, 刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究-高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据. *地学前缘*, 2001, 18(3): 183—191
- 37 Cumming G L, Richard J R. Ore lead isotope ratios in continuously changing earth. *Earth Planet Sci Lett*, 28: 151—171
- 38 李永安, 李向东. 中国新疆西南部喀喇昆仑羌塘地块及康西瓦构造带构造演化. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1995
- 39 Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 142: 311—330[DOI]
- 40 Mattern F, Schneider W. Suturing of the Proto- and Paleo-Tethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China). *J Asian Earth Sci*, 2000, 18: 637—650[DOI]
- 41 肖文交, 侯泉林, 李继亮, 等. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程. *中国科学 D: 地球科学*, 2000, 30(增刊): 22—28
- 42 Xiao W J, Windley B F, Chen H L, et al. Carboniferous-Triassic subduction and accretion in the western Kunlun, China: implications for collisional and accretionary tectonics of the northern Tibetan plateau. *Geology*, 2002, 30: 295—298[DOI]
- 43 Xiao, W J, Windley B F, Hao J, et al. Arc-ophiolite obduction in the Western Kunlun Range (China): implications for the Palaeozoic evolution of central Asia. *J Geol Soc*, 2002, 159(5): 517—528
- 44 郭坤一, 张传林, 王爱国, 等. 西昆仑首次发现石榴二辉麻粒岩. *资源调查与环境*, 2003, 24(2): 79—81
- 45 杨坤光, 刘强, 张传林, 等. 西昆仑康西瓦断裂带新发现的麻粒岩. *地质科技情报*, 2003, (1): 103—104
- 46 汪玉珍, 方锡廉. 西昆仑山、喀喇昆仑山花岗岩类时空分布规律的初步探讨. *新疆地质*, 1987, 5(1): 9—24
- 47 方锡廉, 汪玉珍. 西昆仑加里东期花岗岩类浅识. *新疆地质*, 1990, 8(2): 153—158
- 48 Sengor A M C, Okurogullari H. The role of accretionary wedges in the growth of continents: Asiatic examples from Argand to plate tectonics. *Eclogae Geol Helv*, 1991, 84: 535—597
- 49 袁超, 孙敏, 李继亮. 西昆仑中带两个花岗岩岩体的年龄和可能的源区. *科学通报*, 1999, 44(5): 534—538
- 50 Arnaud N, Vidal P H. Geochronology and Geochemistry of the Magmatic Rocks from the Kunlun-Karakorum Geotraverse. Paris: College Kunlun-Karakorum, IPG, 1990